

(19)



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets

(11) Numéro de publication:

**0 389 390**  
**A1**

(12)

# DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(21) Numéro de dépôt: 90420142.3

(51) Int. Cl.<sup>5</sup>: G01R 33/028

(22) Date de dépôt: 19.03.90

(30) Priorité: 21.03.89 FR 8903963

(43) Date de publication de la demande:  
26.09.90 Bulletin 90/39(84) Etats contractants désignés:  
CH DE FR GB IT LI(71) Demandeur: **SEXTANT AVIONIQUE S.A.**  
5/7 rue Jeanne Braconnier Parc Tertiaire  
F-92368 Meudon la Forêt Cédex(FR)

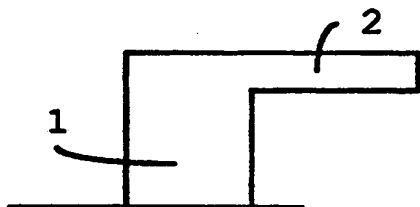
(72) Inventeur: **Donzier, Eric**  
9, Chemin des Allueges  
F-74000 Annecy(FR)  
Inventeur: **Thomas, Isabelle**  
30, Rue Marius Villard  
F-26000 Valence(FR)  
Inventeur: **Spirkovitch, Serge**  
68, Rue des Cévennes  
F-75015 Paris(FR)  
Inventeur: **Baillieu, François**  
13, Rue des Vendangeurs  
F-94440 Marolles En Brie(FR)

(74) Mandataire: **de Beaumont, Michel**  
1bis, rue Champollion  
F-38000 Grenoble(FR)

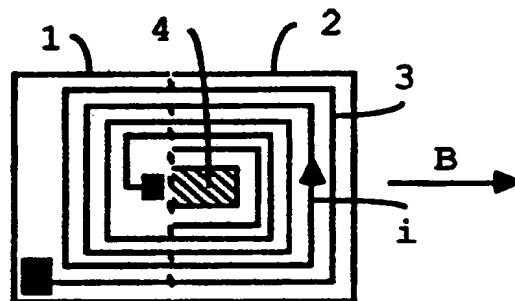
(54) Micromagnétomètre à poutre fléchissante.

(57) La présente invention concerne un micromagné-  
tomètre comprenant au moins une poutre encastrée  
(2) dont une surface principale porte une partie d'un

enroulement (3), constitué d'une métallisation, et  
dont une surface principale comprend des moyens  
piézorésistifs de détection de contrainte (4).



**Figure 1.A**



**Figure 1.B**

EP 0 389 390 A1

## MICROMAGNÉTOMÈTRE À POUTRE FLÉCHISSANTE

La présente invention concerne un micromagnétomètre.

Il est connu, par exemple à partir du brevet français 2 542 453 du Centre Electronique Horloger, de fabriquer des micromagnétomètres en utilisant les technologies mises au point dans le domaine de la fabrication des circuits intégrés sur silicium. L'élément sensible de ces micromagnétomètres est constitué à partir d'une aile ou volet gravé dans un bloc de silicium et solidaire de parties restantes de ce bloc de silicium. Dans le cas du brevet susmentionné, la liaison entre le volet et le bloc de silicium est une liaison par des attaches ou bras de torsion en silicium. Une partie au moins d'un bobinage est formée sur le volet. Le volet est donc soumis à une force quand un courant parcourt le bobinage et qu'un champ magnétique externe est appliqué. A courant constant, la rotation du volet (qui ne se déforme pas) est indicative de l'intensité du champ magnétique.

Ce dispositif de l'art antérieur nécessite pour la détection du déplacement du volet une détection de type capacitif qui impose des conditions difficiles à satisfaire dans un dispositif pratique qui aura notamment des bras de dimensions réduites, ce qui rend le dispositif fragile.

Ainsi, la présente invention a pour objet de prévoir un micromagnétomètre plus simple à fabriquer, plus robuste, et dans lequel la détection d'un déplacement est réalisée plus simplement.

Ces objets de la présente invention sont atteints en prévoyant un micromagnétomètre comprenant au moins une poutre encastrée dont une surface principale porte une partie d'un enroulement, constitué d'une métallisation, et dont une surface principale comprend des moyens piézorésistifs de détection de contrainte.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, ladite poutre est encastrée dans un pied formé d'une seule pièce avec elle à partir d'un bloc de silicium.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, ledit enroulement est parcouru par un courant alternatif de fréquence égale à la fréquence de résonance mécanique de la poutre obtenu par un circuit d'asservissement en utilisant la sortie des moyens piézorésistifs.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, chaque poutre comprend une région amincie en forme de bande le long de sa ligne d'encastrement.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, il est prévu un circuit d'asservissement constitué de conducteurs disposés en regard des poutres et parcourus par un courant pour fournir un

champ de contre-réaction propre à s'opposer au champ extérieur à mesurer.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, l'enroulement est constitué de plusieurs enroulements élémentaires formés dans des plans superposés et isolés entre eux.

Ainsi, le micromagnétomètre selon l'invention est basé sur l'utilisation d'une poutre fléchissante et non pas sur la torsion d'un bras support. Ceci entraîne un avantage de robustesse et permet une détection par des sondes piézorésistives incorporées dans la poutre ou aile fléchissante réalisée en un matériau semiconducteur. L'un des avantages résultant d'une détection piézorésistive, plutôt que d'une détection capacitive, est que l'on s'affranchit de nombreuses contraintes liées à la distance entre le volet mobile et une plaque de référence, distance qui doit être aussi faible que possible dans le cas d'une détection capacitive, pour augmenter la valeur de la capacité. De plus, dans le cas d'une détection capacitive, si on arrive à réaliser une distance plaque/volet très faible, on est conduit à faire fonctionner le dispositif sous vide pour éviter l'amortissement produit par la mince couche d'air existant entre le volet et la plaque de référence.

Ces objets, caractéristiques et avantages de la présente invention seront illustrés plus en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faite en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

les figures 1A et 1B représentent des vues en coupe extrêmement schématiques d'un aspect général de la présente invention ;

les figures 2A et 2B représentent des vues en perspective d'un mode de réalisation de la présente invention en ce qui concerne la structure mécanique ;

la figure 3 représente une vue de dessus d'un dispositif tel que celui des figures 2A et 2B ;

la figure 4 représente de façon plus détaillée un exemple de détecteur piézorésistif adapté à la présente invention ;

la figure 5 représente un exemple de circuits électriques d'un magnétomètre selon la présente invention ; et

la figure 6 représente en A-E des vues de dessus de diverses variantes de structures selon la présente invention.

Les figures 1A et 1B sont des vues de côté et de dessus, respectivement, destinées à illustrer un aspect fondamental de la présente invention. Celle-ci prévoit d'utiliser un bloc de silicium unique comprenant un pied 1 et une aile 2. Dans ce qui précède, l'expression bloc de silicium désigne en fait un

bloc de très petites dimensions formé à partir d'une plaquette de silicium telle que l'on en utilise dans le domaine des circuits intégrés, c'est-à-dire une plaquette ayant une épaisseur de l'ordre de 0,3 à 0,5 mm. La hauteur totale du pied 1 correspond sensiblement à l'épaisseur de la plaquette de silicium, c'est-à-dire qu'elle est de l'ordre de 0,3 à 0,5 mm. En utilisant les techniques usuelles de fabrication des circuits intégrés, et des techniques dérivées, de nombreux dispositifs identiques pourront être fabriqués à partir d'une même plaquette, des lots de plaquettes étant traités simultanément.

Comme le représente la figure 1B, la face supérieure de la structure de la figure 1A est recouverte d'un enroulement 3 constitué normalement d'une métallisation telle qu'une métallisation d'aluminium. Ainsi, si des portions parallèles de l'enroulement sont traversées par un courant marqué par la flèche *i* normalement à un champ *B*, une force s'exercera sur l'aile 2 qui se déformera selon les règles applicables aux poutres fléchissantes encastrées. Une zone 4 de l'aile 2 est munie de moyens de détection de la déflexion, ces moyens pouvant être de façon classique un pont piézorésistif constitué de 4 zones dopées du type de polarité opposé à celui du substrat de silicium. Des contacts pris sur la surface supérieure du pied permettent l'alimentation de l'enroulement 3 et la connexion des bornes du pont de détection. C'est là un avantage des systèmes à poutres fléchissantes que de permettre cette détection par des voies piézorésistives.

En outre, pour obtenir des déplacements de plus grande amplitude de la poutre, le courant électrique circulant dans l'enroulement sera de préférence à une fréquence correspondant à la fréquence de résonance de la poutre.

De préférence, comme le montre la vue en perspective de la figure 2A, on utilisera un système à deux poutres encastrées symétriquement 5 et 6 pour permettre d'améliorer la détection et notamment de s'affranchir des effets d'accélération parasites éventuels qui auraient des effets identiques sur chacune des deux poutres. La figure 2B est une vue en perspective analogue à la figure 2A représentant un état de déformation pris par la poutre quand un courant passe et qu'un champ est appliqué (on notera qu'en cas d'accélération, les déplacements des deux moitiés de poutre seraient dans le même sens). Cet état de déformation résulte des orientations du champ *B*, du courant *i* et des forces *F* indiquées en figure 2A.

A titre d'exemple d'un dispositif pratique, comme cela a été indiqué précédemment, le pied 1 peut avoir une hauteur de 0,3 à 0,5 mm, chacune des ailes sensibles peut avoir une épaisseur de l'ordre de 15 micromètres, chacune de ces ailes 5 et 6 peut avoir une longueur en débordement par

rapport au pied de l'ordre du millimètre et une largeur de l'ordre de 2 millimètres, le pied lui-même ayant une longueur, c'est-à-dire une distance entre les encastrements des poutres, de l'ordre du millimètre. L'encombrement total du dispositif est donc de 2x3 mm. Avec de telles dimensions, la fréquence de résonance mécanique des ailes est de l'ordre de la vingtaine de kilohertz. Plusieurs dispositifs de ce type peuvent être formés simultanément sur une plaquette de circuit intégré par gravure anisotrope. Des dispositifs de dimensions nettement inférieures pourront également être réalisés par l'homme de l'art.

La figure 3 représente un exemple d'une vue de dessus d'une structure telle que celle de la figure 2A. Les pointillés 11 et 12 représentent la limite de chacune des ailes 5, 6 ou en d'autres termes leurs zones d'encastrement avec le pied 1. Une métallisation 13 est enroulée entre un plot externe 14 et un plot interne 15. Dans la zone centrale de la structure, à la limite de chaque encastrement d'aile, sont formés des détecteurs piézorésistifs en pont 16 et 17 qui seront décrits plus en détail ci-après et dont les bornes d'accès sont reliées à des plots 18 et 19, respectivement, ces plots, comme les plots 14 et 15, étant formés sur le pied central 1 de la structure. Les piézorésistances sont constituées de zones diffusées de type de conductivité opposé à celui du substrat de silicium constituant la structure.

La figure 4 représente un exemple de réalisation de détecteur en pont selon la présente invention dont la structure présente par rapport à une structure classique en carré l'avantage de limiter l'influence des courants induits.

Ce détecteur comprend quatre zones diffusées sensiblement rectilignes, deux à deux orthogonales, et deux à deux parallèles 20, 21 et 22, 23. Ces zones sont reliées les unes aux autres et à des plots d'accès 18 par des métallisations 24. Ces zones et les métallisations sont disposées pour qu'il n'existe pas entre elles d'étendue fermée de surface importante. Ainsi, dans la figure 4, les régions parallèles 20 et 21 sont très proches l'une de l'autre.

Comme on l'a indiqué précédemment, la structure selon la présente invention fonctionne de préférence avec un courant alternatif dans l'enroulement 3, 13, à une fréquence correspondant à la fréquence de résonance mécanique des poutres. Un asservissement sur la fréquence de résonance peut être obtenu avec un circuit du type de celui représenté en figure 5, qui correspond au cas simplifié de la structure des figures 1A et 1B. La sortie du détecteur 4 est rebouclée sur l'enroulement capteur 3 par l'intermédiaire d'un amplificateur 31, d'un circuit correcteur de phase 32 et d'un circuit de contrôle d'amplitude 33. On obtient

ainsi un oscillateur dont la fréquence se centre sur la ou l'une des fréquences de résonance mécanique de la poutre.

En outre, la sensibilité du système étant élevée, on pourra préférer asservir le champ magnétique au niveau du capteur à une valeur très faible en créant un champ de contre-réaction voisin du champ extérieur à mesurer et de signe opposé. La mesure consistera alors à déterminer la valeur du champ de contre-réaction, par exemple par la mesure du courant qui lui a donné naissance.

Le champ de contre-réaction résulte par exemple du courant fourni par un ou plusieurs conducteurs formés sur le support sur lequel est disposée la structure selon l'invention. Ce support est par exemple une plaque de céramique 7 (voir figure 2A) sur laquelle est collée la base du pied 1 de la structure selon l'invention. Ces conducteurs s'étendent parallèlement à la ligne d'encastrement de la poutre, c'est-à-dire parallèlement aux conducteurs de l'enroulement 3 de la figure 1B de façon à produire au niveau de l'aile un champ sensiblement parallèle et opposé au champ extérieur à mesurer. Les conducteurs de contre-réaction sont schématisés en figure 5 par l'enroulement 41. Le circuit de contre-réaction utilise la sortie de l'amplificateur 31 et l'applique à la bobine 31 par l'intermédiaire d'un détecteur d'amplitude 42, d'un correcteur de phase 43 et d'un intégrateur 44.

Les circuits de la figure 5 seront simplement mis en oeuvre par l'homme de l'art qui pourra en réaliser de nombreuses variantes. Notamment dans le cas d'un capteur du type de celui des figures 2A, 2B et 3, on utilisera de préférence des circuits symétriques permettant de doubler la sensibilité et de s'affranchir de divers artefacts.

Une structure selon la présente invention sera en pratique montée de sorte que le pied est fixé à un substrat 7 et qu'un capot supérieur (non représenté) vient en particulier reprendre le contact sur les plots 14, 15, 18 et 19 apparaissant sur la surface supérieure du pied de la structure. Ce capot sera de préférence un capot étanche permettant de placer la structure dans une atmosphère contrôlée. Toutefois, avec une structure selon l'invention, les ailes fléchissantes peuvent être relativement éloignées du support et l'amortissement dû à la lame d'air interstitielle est négligeable. Il n'est donc pas nécessaire dans le cas général de mettre la structure sous vide.

Une étude théorique du fonctionnement des poutres fléchissantes montre que les détecteurs piézorésistifs doivent de préférence être placés comme cela a été représenté au voisinage de la zone d'encastrement de chacune des poutres car c'est l'emplacement où l'allongement est maximal quand la poutre oscille.

On peut aussi montrer que le signal électrique

recueilli et le rapport signal sur bruit sont inversement proportionnels à l'épaisseur de la poutre et ne dépendent pratiquement d'aucune autre dimension. Il en résulte, d'une part, qu'un dispositif selon l'invention est simple à fabriquer et peu sensible à des fluctuations des paramètres de fabrication et, d'autre part, que le dispositif peut être considérablement miniaturisé.

La figure 6 illustre divers exemples de vues de dessus d'un capteur selon la présente invention. Dans la vue de dessus A, on retrouve le capteur qui a été précédemment décrit. Un inconvénient de cette structure pourrait être que, s'il existe de légères différences entre les dimensions des deux ailes symétriques 5 et 6, celles-ci vont avoir des fréquences propres différentes. Il est donc prévu de réaliser un couplage mécanique entre les deux ailes pour obtenir une oscillation à la même fréquence. Les vues de dessus B, C, D et E représentent des exemples de tels couplages, qui impliquent une liaison par une ou plusieurs plaques de liaison 50 entre les deux ailes 51 et 52. Ces plaques de liaison sont latérales dans le cas B, latérales et centrale dans le cas C, latérales mais interrompues par une largeur de pied restante très faible dans le cas D et latérales et séparées du pied central par un évidement 53 dans le cas F.

Dans ce qui a été décrit précédemment, le dispositif était utilisé en micromagnétomètre, les indications des deux détecteurs piézorésistifs étant combinées pour éliminer les flexions de même sens. Le dispositif selon la présente invention peut également fonctionner en accéléromètre si au contraire les indications de sortie des détecteurs piézorésistifs sont combinées de façon additive quand les deux poutres se déplacent dans le même sens. Un tel accéléromètre sera peu sensible puisqu'on a sélectionné des ailes de faible masse pour une bonne détection de l'influence des champs magnétiques sur un bobinage mais permettra néanmoins de détecter une accélération importante.

Bien entendu, de nombreuses variantes et modifications de la présente invention apparaîtront à l'homme de l'art. Par exemple, au lieu d'un enroulement en une seule couche tel que décrit précédemment, on pourra prévoir un premier dépôt d'aluminium configuré en bobine comme cela a été décrit, puis un revêtement de l'ensemble de la structure par un isolant et la formation d'une deuxième spire d'aluminium déposée.

Des modifications de forme pourront aussi être apportées aux ailes constituant les poutres encastrees. Par exemple, ces ailes pourront avoir une première épaisseur dans leurs parties éloignées de l'encastrement et une deuxième épaisseur, plus faible, dans une région en forme de bande longeant la région d'encastrement et comprenant des

détecteurs piézorésistifs. A titre d'exemple, la première épaisseur pourrait être de l'ordre de 30 micromètres et la deuxième de l'ordre de 10 micromètres. On obtient ainsi une structure très sensible tout en conservant une bonne rigidité aux ailes.

## Revendications

1. Micromagnétomètre caractérisé en ce qu'il comprend au moins une poutre encastrée (2 ; 5, 6) dont une surface principale porte une partie d'un enroulement (3), constitué d'une métallisation, et dont une surface principale comprend des moyens piézorésistifs de détection de contrainte (4 ; 20-23).

2. Micromagnétomètre selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite poutre est encastrée dans un pied (1) formé d'une seule pièce avec elle à partir d'un bloc de silicium.

3. Micromagnétomètre selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit enroulement est parcouru par un courant alternatif de fréquence égale à la fréquence de résonance mécanique de la poutre obtenu par un circuit d'asservissement (31-33) en utilisant la sortie des moyens piézorésistifs

4. Micromagnétomètre selon la revendication 1, caractérisé en ce que chaque poutre comprend une région amincie en forme de bande le long de sa ligne d'encastrement.

5. Micromagnétomètre selon la revendication 1, caractérisé en ce que deux poutres symétriques (5, 6) s'étendent de part et d'autre d'un pied (1), un même enroulement (13) étant formé sur l'ensemble des deux poutres.

6. Micromagnétomètre selon la revendication 5, caractérisé en ce que les poutres s'étendent latéralement de part et d'autre du pied, sur une faible étendue) et se rejoignent, de façon à assurer un couplage des poutres (Figures 6B-E).

7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce qu'il est associé à un circuit d'asservissement constitué de conducteurs disposés en regard des poutres et parcourus par un courant pour fournir un champ de contre-réaction propre à s'opposer au champ extérieur à mesurer.

8. Micromagnétomètre selon la revendication 2, caractérisé en ce que le détecteur piézorésistif est constitué d'un pont de résistances formées par diffusion d'un dopant du type de conductivité opposé dans le silicium formant les poutres, en ce que ce détecteur est disposé au voisinage du pied, et en ce qu'il comprend quatre résistances disposées deux à deux parallèlement et reliées de façon à délimiter une région de surface minimale.

9. Micromagnétomètre selon la revendication 5, caractérisé en ce que l'enroulement est une métallisation d'aluminium disposée selon des spires

concentriques, la spire la plus externe allant d'une poutre à l'autre, au bord de ces poutres.

10. Micromagnétomètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que l'enroulement est constitué de plusieurs enroulements élémentaires formés dans des plans superposés et isolés entre eux.

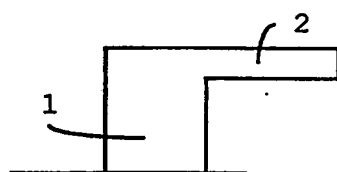


Figure 1.A

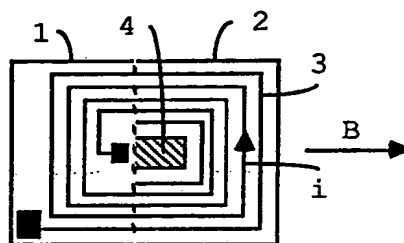


Figure 1.B

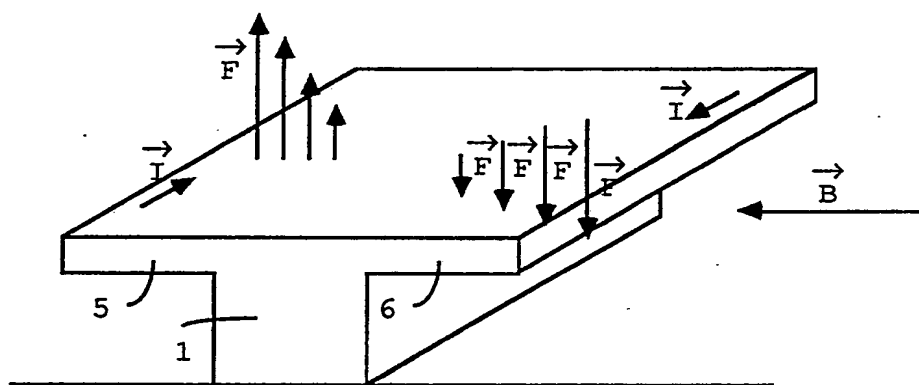


Figure 2.A

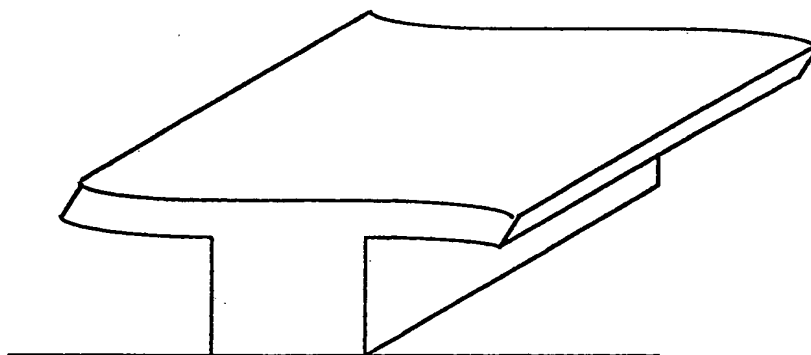


Figure 2.B

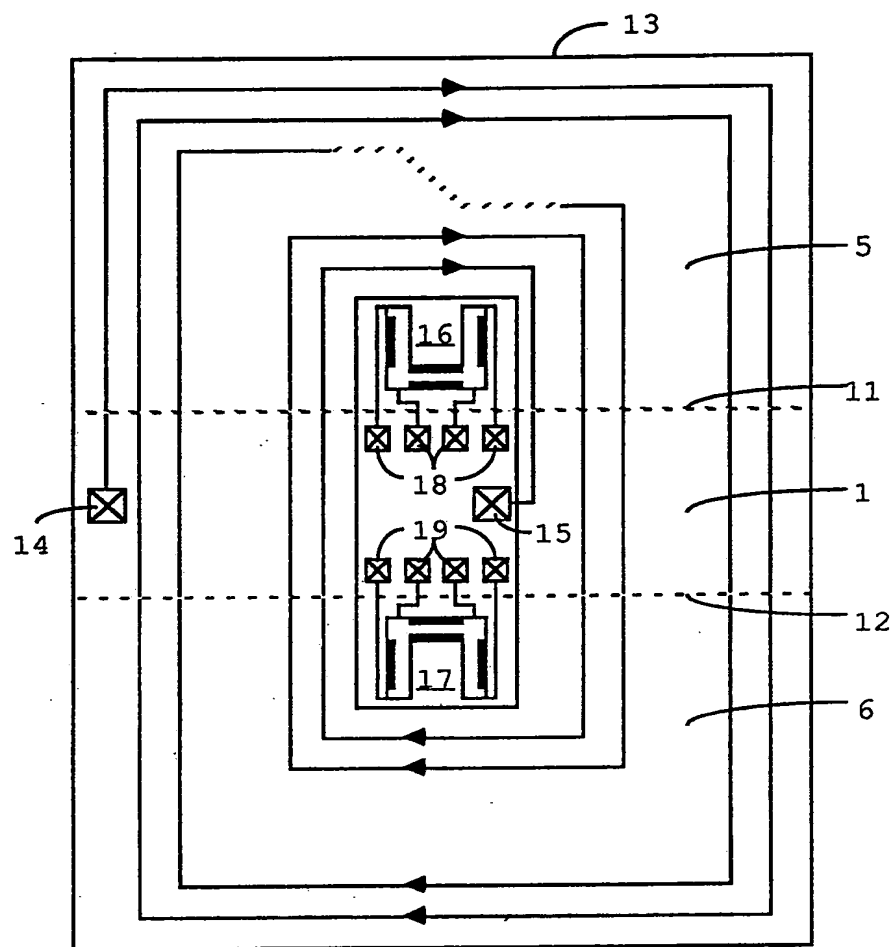


Figure 3

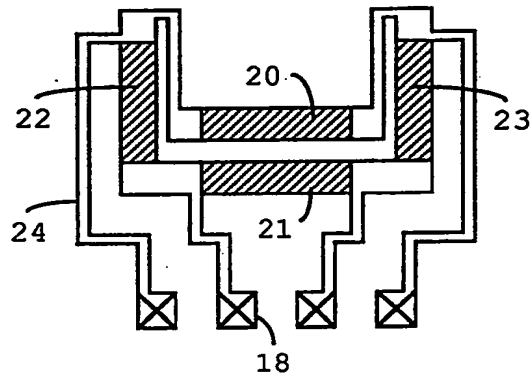


Figure 4

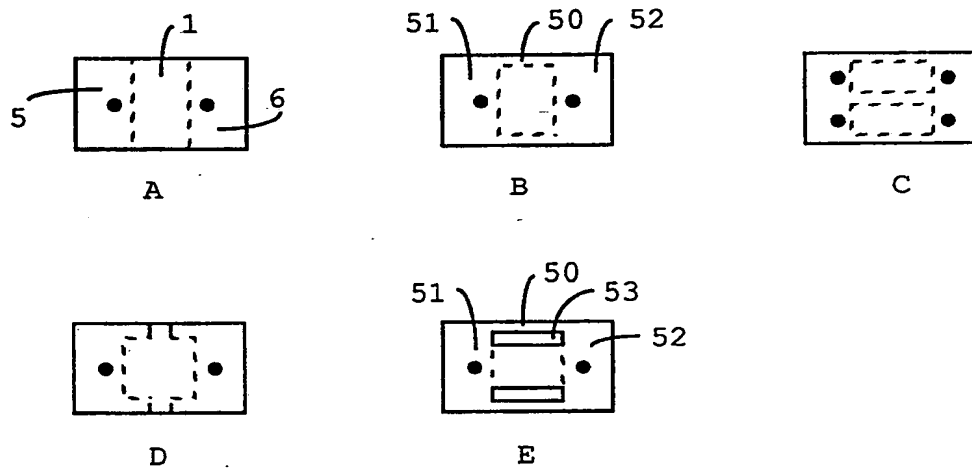


Figure 6

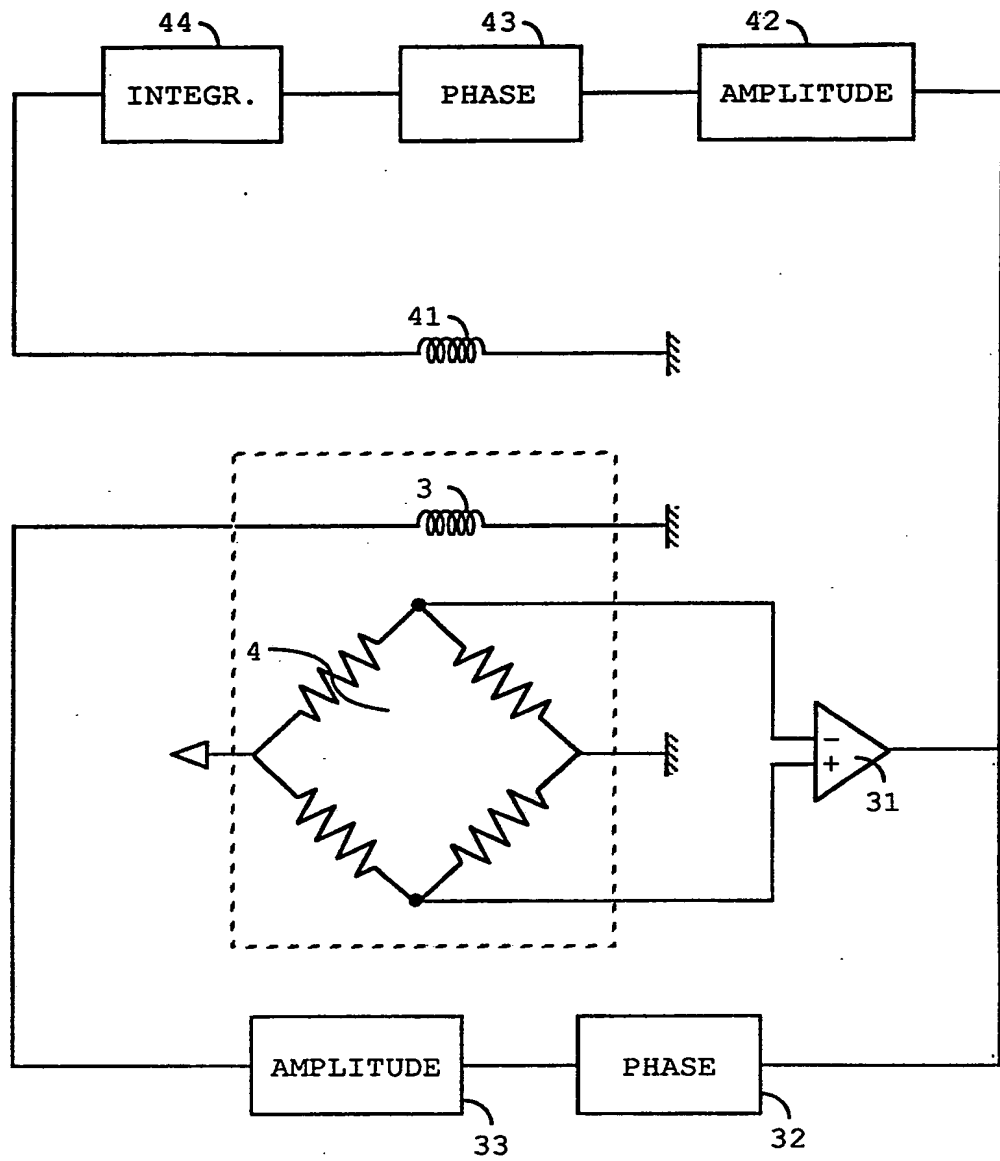


Figure 5



Office européen  
des brevets

# RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numero de la demande

EP 90 42 0142

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int. Cl.5)
D, A	GB-A-2136581 (CENTRE ELECTRONIQUE HORLOGER SA) * page 1, lignes 46 - 59 * * page 2, lignes 12 - 26 * * figures 1, 2 * ----	1, 5, 9	G01R33/028
A	GB-A-857459 (TESLA NARODNI PODNIK) * page 1, lignes 54 - 75 * * page 2, lignes 61 - 70 * ----	1, 3	
A	FR-A-2425647 (MOSKOVSKY ENERGETISCHESCHKY INSTITUT) * page 4, lignes 17 - 28 * -----	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl.5)
			G01R
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche LA HAYE		Date d'achèvement de la recherche 25 JUIN 1990	Examineur SWARTJES H.M.
<b>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</b> X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande I : cité pour d'autres raisons ..... & : membre de la même famille, document correspondant			

EP 0 389 390

EP 389390.

17/1/85

## PATENTS ACTS - 1977

IN THE MATTER of a European  
Patent (UK) in the name of

## SEXTANT AVIONIQUE

I, Michel de BEAUMONT, 1bis, Rue Champollion, 38000 GRENOBLE, FRANCE  
fully conversant with the English and French languages, hereby certify  
that to the best of my knowledge and belief the following is a true  
translation into the English language, which has been made by me and  
for which I accept responsibility, of the specification of the European  
Patent No : 0 389 390  
Application No : 90420142.3

Signed this 29th day of August 1994



Michel de Beaumont

## A MICROMAGNETOMETER INCLUDING A DEFLECTING BEAM

The invention generally relates to micromagnetometers.

It is known, for example from FR-A-2,542,453 filed by Centre Electronique Horloger, to fabricate micromagnetometers by using technologies developed for the manufacturing of silicon integrated circuits. The sensitive element of these micromagnetometers is constituted from a wing or flap that is etched in a silicon block and is integral with the remaining portions of the silicon block. In the above-mentioned patent, the connection between the flap and the silicon block is made by silicon hinges or torsion arms. At least one portion of a coil is formed on the flap. Accordingly, the flap is subjected to a force when a current flows through the coil and when an external magnetical field is applied. With a constant current, the rotation of the flap (that does not get deformed) is indicative of the intensity of the magnetical field.

This prior art device requires a capacitive-type detection device for detecting the displacement of the flap, which imposes conditions that are difficult to be complied with in a practical device that has, in particular, small-sized arms which renders the device fragile.

WO-A-8808522 discloses an accelerometer, with a deformable diaphragm and a piezo-resistive detection, that can also be used as a magnetometer.

Thus, an object of the present invention is to provide a micromagnetometer that is simpler to manufacture, more robust, and in which displacements are more easily detected.

These objects of the present invention are achieved by providing a micromagnetometer including at least one embedded beam, one of the main surfaces of which carries a portion of a winding that is formed by a metallization, and one of the main surfaces of which includes piezo-resistive means for detecting stresses, said at least one beam being embedded in a single leg integral therewith.

According to an embodiment of the invention, the beam is embedded in a single leg integral therewith and made from a silicon block.

According to an embodiment of the invention, an a.c. current having a frequency equal to the mechanical resonance frequency of the beam flows in the winding, the current being provided by a servo-control circuit using the output of the piezo-resistive means.

According to an embodiment of the invention, each beam includes a thinner region shaped like a strip along its embedment line.

According to an embodiment of the invention, the device is associated with a servo-control circuit formed by conductors facing the beams and conducting a current to provide a negative feedback field opposed to the external field to be measured.

According to an embodiment of the invention, the winding is constituted by a plurality of elementary windings that are formed within superposed planes and are mutually insulated.

According to an embodiment of the invention, the winding is an aluminum metallization disposed in concentric turns, the extreme external turn running from a beam to the other, along the edge of said beams.

Thus, the micromagnetometer according to the invention is based on the use of an embedded beam and not on

the torsion of a support arm. This imparts an advantageous robustness to the system and allows detection by means of piezo-resistive detectors incorporated in the deflecting beam or wing made of a semiconductor material.

5 One of the advantages resulting from piezo-resistive detection, instead of capacitive detection, is that many constraints, associated with the distance between the mobile wing and a reference plate, are avoided - this distance must be as short as possible when using capacitive detection in order to increase the value of the

10 capacitor. In addition, the use of capacitive detection, when a very short distance between the plate and the flap is obtained, makes it necessary to operate the device under a vacuum to avoid dampening produced by the thin

15 air layer existing between the flap and the reference plate.

The foregoing and other objects, features and advantages of the invention will be apparent from the following detailed description of specific embodiments as

20 illustrated in the accompanying drawings wherein:

Figs. 1A and 1B are schematic cross-sectional views of a general aspect of the present invention;

Figs. 2A and 2B are perspective views of an embodiment according to the present invention of the mechanical

25 structure;

Fig. 3 is a top view of a device such as that of Figs. 2A and 2B;

Fig. 4 represents in more detail an exemplary piezo-resistive detector adapted to the present invention;

30 Fig. 5 represents exemplary electric circuits of a magnetometer according to the invention; and

Figs. 6A-6E represent top views of various alternative structures according to the invention.

Figs. 1A and 1B are a side and a top view, respectively, illustrating a fundamental aspect of the present invention. The invention uses a single silicon block including a leg 1 and a wing 2. In the above description, "silicon block" is to be construed as a very small-size block formed from a silicon wafer such as used in the field of integrated circuits, that is, a wafer having a thickness ranging approximately from 0.3 to 0.5 mm. The total height of leg 1 substantially corresponds to the thickness of the silicon wafer, that is, approximately 0.3 to 0.5 mm. By using conventional techniques for the manufacturing of integrated circuits, and techniques derived therefrom, many identical devices can be manufactured from a same wafer, wafer batches being simultaneously treated.

As represented in Fig. 1B, the upper surface of the structure of Fig. 1A is coated with a winding 3 that is normally constituted by a metallization such as an aluminum metallization. Thus, if parallel portions of the winding are flown through by a current, represented by arrow  $i$ , normal to a field  $B$ , a force is applied upon wing 2 that will be deformed in accordance with the rules relating to embedded deflecting beams. An area 4 of wing 2 is provided with means for detecting deflection. These means can be a piezoresistive bridge constituted by four doped area having a conductivity type opposite to that of the silicon substrate. Contacts on the upper surface of the leg allow for the supply of winding 3 and the connection of the terminals of the detection bridge. This is an advantageous aspect of deflecting beam systems which allow for detection by piezo-resistive means.

In addition, to obtain a greater magnitude of the beam displacements, the frequency of the electric current

flowing in the winding is preferably a frequency corresponding to the resonance frequency of the beam.

Preferably, as shown by the perspective view of Fig. 2A, a system including two symmetrically embedded beams, 5, 6, is used to improve detection and more particularly to get free from possible parasitic acceleration effects that would have identical effects on each of the two beams. Fig. 2B is a perspective view, analogous to Fig. 2A, representing the deformation of the beam when conducting a current and when a field is applied (it should be noted that during an acceleration, the displacements of the two halves of the beam would occur in the same direction). This deformation results from the orientations of field B, current I and from forces F that are indicated in Fig. 2A.

By way of example of a practical device, as indicated above, the height of leg 1 can range from 0.3 to 0.5 mm, the thickness of each sensitive wing can be approximately 15  $\mu\text{m}$ , each wing 5, 6 can protrude from the leg by approximately 1 mm and can have a width of approximately 2 mm, the leg itself having a length, that is, a distance between the beam embedments, of approximately 1 mm. The overall size of the device is therefore 2x3 mm. With such sizes, the mechanical resonance frequency of the wings is approximately 20 KHz. Several devices of this type can be simultaneously formed on an integrated circuit wafer by anisotropic etching. Much smaller devices can also be devised by those skilled in the art.

Fig. 3 is an exemplary top view of a structure such as the one of Fig. 2A. The dotted lines 11 and 12 represent the edge of each wing 5, 6, or in other words, their embedment areas with the leg 1. A metallization 13 is wound between an external pad 14 and an internal pad 15.

In the central area of the structure, at the edge of each wing embedment, are formed bridge-connected piezo-resistive detectors 16, 17 that will be described in more detail hereinafter. The access terminals of the bridges 5 16, 17 are connected to pads 18, 19, respectively. Pads 18, 19, like pads 14, 15, are formed on the central leg 1 of the structure. The piezo-resistors are constituted by diffused areas having a conductivity type opposed to that of the silicon substrate constituting the structure.

10 Fig. 4 represents an exemplary embodiment of a bridge detector according to the present invention whose structure has the advantage, over a conventional square-shaped structure, of limiting the influence of induced currents.

This detector includes four substantially linear diffused areas, a first pair, 20, 21, of parallel areas being orthogonal to another pair, 22, 23, of parallel areas. These areas are connected to each other and to connecting pads 18 through metallizations 24. These areas and metallizations are disposed so that there is no 15 closed surface of large area between them. Thus, in Fig. 4, the parallel regions 20, 21 are very close to each other.

As indicated above, the structure according to the invention preferably operates with an a.c. current in winding 3, 13, at a frequency corresponding to the 25 mechanical resonance frequency of the beams. The resonance frequency can be controlled by a circuit such as the one represented in Fig. 5, that corresponds to the simplified structure of Figs. 1A and 1B. The output of detector 4 is looped back on the sensor winding 3 through 30 an amplifier 31, a phase correcting circuit 32 and an amplitude control circuit 33. Thus, one obtains an oscil-

lator whose frequency is centered on either one of the mechanical resonance frequencies of the beam.

In addition, since the sensitivity of the system is high, it may be preferred to servo-control the magnetic field near the sensor at a very low value by generating a negative feedback field substantially equal to the external field of opposite polarity to be measured. Measurements then consist in determining the value of the negative feedback field, for example by measuring the current that generated it.

The negative feedback field results, for example, from the current provided by one or more conductors formed on the support on which the structure according to the invention is disposed. The support is, for example, a ceramic plate 7 (refer to Fig. 2A) on which is glued the base of leg 1 of the structure according to the invention. The conductors extend in parallel with the embedment line of the beam, i.e., in parallel with the conductors of winding 3 of Fig. 1B in order to provide near the wing a field substantially parallel and opposed to the external field to be measured. The negative feedback conductors are schematically represented in Fig. 5 by winding 41. The negative feedback circuit uses the output of amplifier 31 and applies it to coil 41 through an amplitude detector 42, a phase corrector 43, and an integrator 44.

The circuits of Fig. 5 will be easily implemented by those skilled in the art who will be able to realize various alternative embodiments therefrom. More particularly, for implementing a detector such as the one shown in Figs. 2A, 2B, and 3, symmetrical circuits that double the sensitivity and avoid various artefacts are preferably used.

In practice, a structure according to the invention is mounted so that the leg is fixed to a substrate 7 and an upper cover (not shown) in particular contacts pads 14, 15, 18, and 19 appearing at the upper surface of the leg of the structure. This upper cover is preferably air-tight to make it possible to place the structure under a controlled atmosphere. However, with the structure according to the invention, the deflecting wings may be disposed relatively far away from the support, so the dampening due to the interstitial layer of air is negligible. Accordingly, it is unnecessary, in general cases, to place the structure under a vacuum.

Theoretical studies of the operation of deflecting beams show that the piezo-resistive detectors must preferably be placed, as is shown, near the embedment area of each beam because this is the place where deflection is maximum when the beam oscillates.

It can also be demonstrated that the electric signal from the detectors and the signal to noise ratio are reversely proportional to the thickness of the beam and practically do not depend upon any other dimensional parameter. As a result, on the one hand, a device according to the invention is easily manufactured and is little sensitive to changes in the manufacturing parameters and, on the other hand, the device can be significantly miniaturized.

Fig. 6 illustrates various exemplary top views of a detector according to the invention. The top view A shows again the detector that has been described above. A drawback of this structure is that, if there are slight differences between the sizes of the two symmetrical wings 5 and 6, the latter have dissimilar resonance frequencies. Therefore, a mechanical coupling is provided between the

two wings so that oscillations having the same frequency are obtained. The top views B, C, D, and E represent examples of such couplings, which imply a connection by one or more coupling plates 50 between both wings 51, 52.

5 The coupling plates 50 are lateral in drawing B, lateral and central in drawing C, lateral but interrupted by a very small remaining width of the leg in drawing D, and lateral and separated from the central leg by a recess 53 in drawing E.

10 In the above description, the device is used as a micromagnetometer, the values of the two piezo-resistive detectors being combined to eliminate flexions occurring in the same direction. The device according to the present invention can also operate as an accelerometer if,

15 on the contrary, the output values of the piezo-resistive detectors are added when both beams move in the same direction. Such an accelerometer is little sensitive since low-mass wings are selected to provide good detection of the influence of the magnetic fields on a coil;

20 however, such an accelerometer is capable of detecting significant accelerations.

As is apparent to those skilled in the art, various modifications can be made to the above disclosed preferred embodiments. For example, instead of using a

25 single-layer winding such as above described, a first aluminum winding conformed as a coil, as above can be deposited; then, the whole structure can be coated with an insulating material, and a second aluminum winding can be formed.

30 Also, the shape of the wings constituting the embedded beams can be modified. For example, the wings can have a first thickness in their portions that are disposed far away from the embedment, and a second thinner

10

thickness in a region shaped like a strip running along the embedment region and including piezo-resistive detectors. By way of example, the first thickness can be approximately 30  $\mu\text{m}$ , and the second thickness can be  
5 approximately 10  $\mu\text{m}$ . Thus, a very sensitive structure is obtained while maintaining satisfactory rigidity of the wings.

CLAIMS

1. A micromagnetometer including at least one embedded beam (2; 5,6) one of the main surfaces of which carries a portion of a winding (3) made of a metallization, and one of the main surfaces of which includes piezo-resistive means for detecting stresses (4; 20-23), said  
5 at least one beam being embedded in a single leg (1) integral therewith.

2. The micromagnetometer of claim 1, characterized in that it is formed in a silicon block.

10 3. The micromagnetometer of claim 1, characterized in that an a.c. current having a frequency equal to the mechanical resonance frequency of the beam flows in said winding, said current being provided by a servo-control circuit (31-33) by using the output of the piezo-resis-  
15 tive means.

4. The micromagnetometer of claim 1, characterized in that each beam includes a thinner strip-shaped region along its embedment line.

20 5. The micromagnetometer of claim 1, characterized in that two symmetrical beams (5, 6) extend on both sides of a leg (1), a single winding (13) being formed on the two beams.

25 6. The micromagnetometer of claim 5, characterized in that said beams (5, 6) extend laterally on both sides of the leg, over a small length, and contact each other, so as to provide coupling of the beams.

7. The device of any of claims 1 to 6, characterized in that it is associated with a servo-control circuit (41-44) formed by conductors (41) facing the beams and

conducting a current to provide a negative feedback field opposed to the external field to be measured.

5 8. The micromagnetometer of claim 2, characterized in that the piezo-resistive detector is constituted by a resistor bridge (20-23) formed by diffusing a dopant having an opposite conductivity type into the silicon forming the beams, said detector is disposed near the leg (1), and it comprises four resistors, pairs of which are parallel disposed and connected so as to delineate a  
10 minimum surface area.

15 9. The micromagnetometer of claim 5, characterized in that said winding (13) is an aluminum metallization disposed in concentric turns, the extreme external turn running from a beam to the other, along the edge of said beams.

10. The micromagnetometer of any one of claims 1 to 9, characterized in that the winding is constituted by a plurality of elementary windings that are formed within superposed planes and are mutually insulated.

1/4

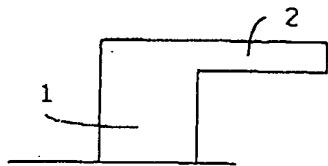


Figure 1.A

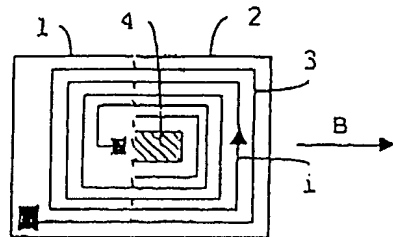


Figure 1.B

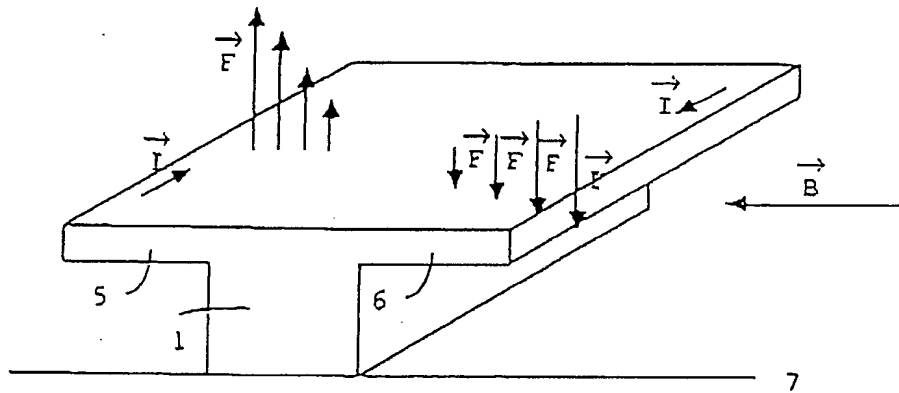


Figure 2.A

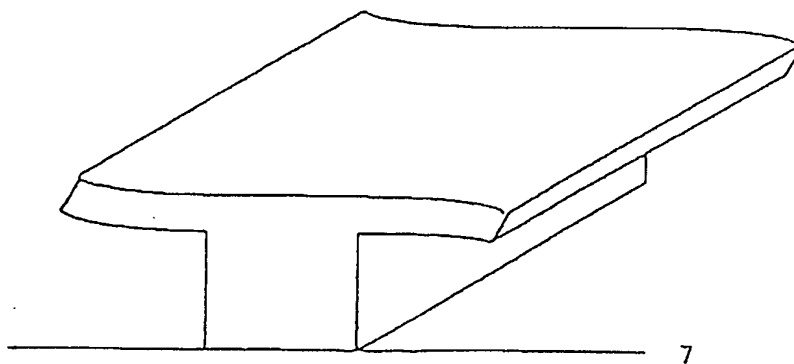


Figure 2.B

3  
6  
5  
8

2/4

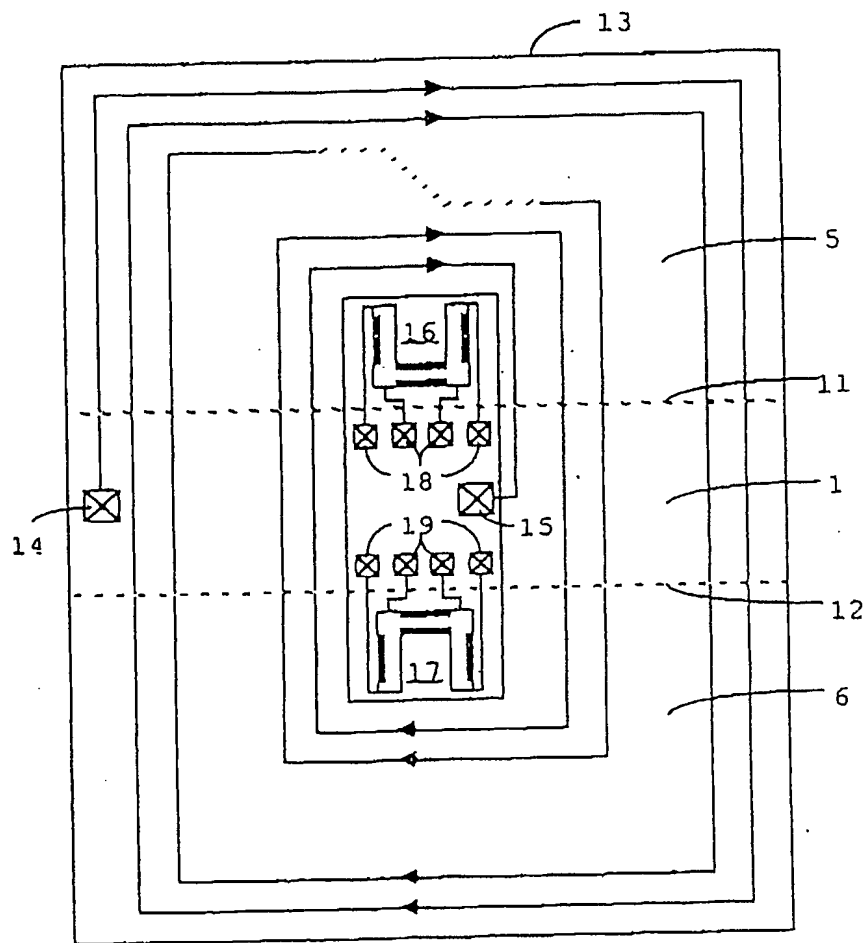


Figure 3

3/4

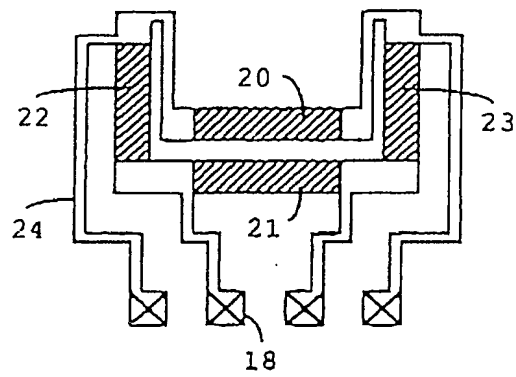


Figure 4

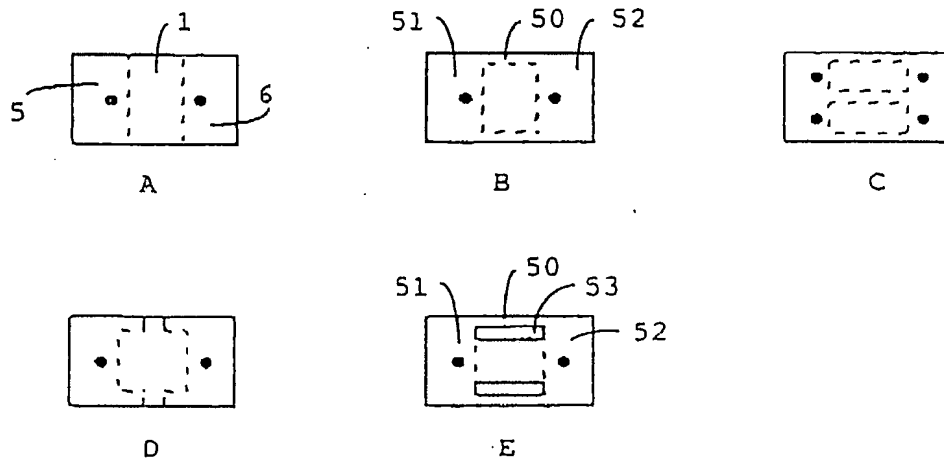


Figure 6

4/4

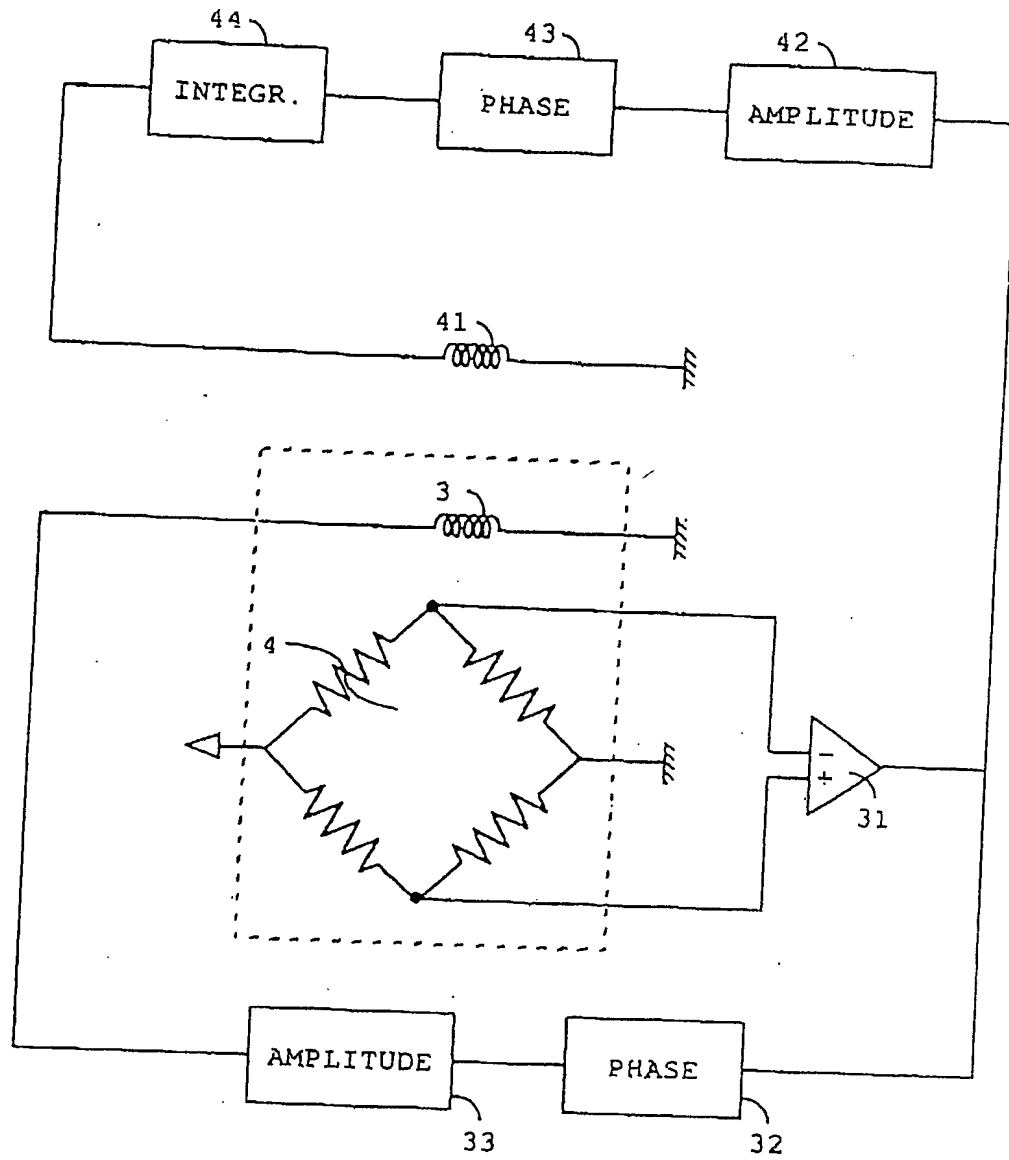


Figure 5